2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체영역제어계통의 로물리 모델

The Reactor Physics Model of Liquid Zone Control System

고병만, 지준석, 김상녕
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

요 약

월성 2호기에서 발생한 액체영역제어계통의 수위와 출력의 급등락 및 흔들림 현상은 국내외 여러 CANDU형 원전에서 공통적으로 발생하는 문제로서 현재까지 명확한 원인 규명이 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 이러한 불안정 현상의 원인을 규명하는 연구의 일부로서 노심에서 발생하는 물리적 현상을 중점적으로 연구하였다. 특히 노심의 반응도 변화에 영향을 주는 요인들을 모델링하고 이를 통해 노심에서 발생하는 물리적 현상 중 액체영역제어계통의 불안정 현상의 원인으로 추정되는 요인을 확인 하고자 한다. 본 연구에서는 Xe에 의한 반응도 변화를 주요 원인으로 추정하였으나 큰 성과는 얻을 수 없었다. 다만 모델링을 통한 수위와 출력 변화에 대한 모사는 본 연구와 병행되어 진행 중인 액체영역제어계통의 수력학적 분석에 연계되어 사용할 수 있다.

Abstract

It is a common problem that the zone power & LZC level sharply drop and rise in CANDU reactor. It has not been yet found out the cause. Therefore, this study is focused on boiling out the reason. However, our research is limited to the reactor physics. Specially, it has been the factor to affect the reactivity such as, replacement of fuel, Xenon effect, and LZC′s level etc. were reflected in our model. From the calculation of the reactivity, we concluded that the instability of the power & LZC′s level would not be affected by Xenon effect. However, the calculation of the reactivity depending on the level of LZC would be used for the hydraulic analysis to be achieved with other project.

Ⅰ. 서 론

1. 연구 배경

월성 2호기를 비롯한 CANDU형 원전에서 발생한 액체영역제어계통(Liquid Zone Control System ; LZCS)의 수위와 출력의 급등락 및 흔들림(Cycling) 현상은 원전의 안정된 제어에 영향을 줄 뿐만 아니라 원인 규명이 이루어지지 않을 경우 원전의 안전성에까지 영향을 줄 수 있다. 이러한 문제는 특정 발전소만이 아닌 국내외 여러 발전소에서 공통적으로 발생하는 문제로서 현재까지 명확한 원인 규명이 이루어지지 않고 있다.

2. 연구 목적 및 내용

본 연구는 액체영역제어계통에서 발생하고 있는 불안정 현상의 원인을 규명하는 연구의 일부로서 노심에서 발생하는 물리적 현상을 중점적으로 연구하였다. 특히 노심의 반응도 변화에 영향을 주는 요인들을 모델링하고 이를 통해 불안정 현상을 확인함으로서 원인을 규명하고자 한다.

본 연구의 내용은 크게 다음과 같다.
첫째, 노내 반응도에 영향을 주는 여러 물리적 현상들 중 반응도 변화에 큰 영향을 미치는 현상들을 선별하여 모델링 하였다.
둘째, 노내 여러 물리적 현상들 중 Xenon의 영향에 의한 반응도 변화를 불안정 현상의 원인으로 추정하였으며 이로 인한 불안정 현상 발생에 대한 단계를 모사하였다.
셋째, 각 모델링을 통합하여 노심에 대한 종합 모델링을 제시하였으며, 액체영역제어계통의 수위와 출력 변화에 대한 모사를 실행하였다.

연구 결과를 통하여 노심에서 발생하는 물리적 현상 중 액체영역제어계통의 불안정 현상 원인으로 추정되는 요인을 확인 하고자 한다. 또한 종합 모델링을 통한 수위와 출력 변화에 대한 모사는 본 연구와 병행되어 진행 중인 액체영역제어계통의 수력학적 분석에 연계되어 사용할 수 있다.

Ⅱ. 본 론

일반적으로 CANDU형 원전의 노내 반응도 변화에 영향을 주는 물리적 현상들은 다음과 같다.

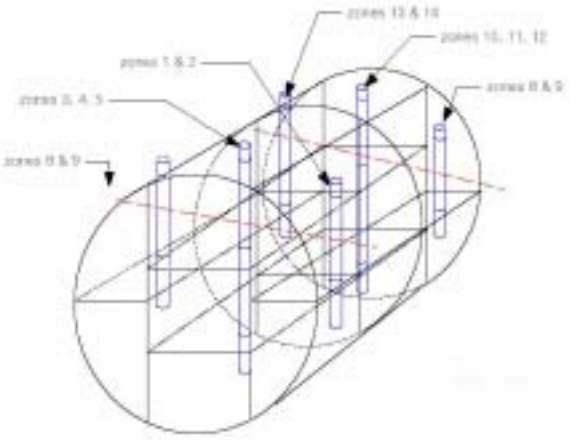
- 새 연료 및 평형상태의 연료 연소 및 Pu의 증가
- 핵연료 및 냉각재, 감속재의 온도변화
- Xenon 및 Samarium의 농도의 변화
- 연료 교체나 제어봉 이동으로 인한 중성자속 진동

위의 현상들 중 반응도 변화에 비교적 큰 영향을 주는 현상들을 모델링 하였으며 모델링을 위한 노심 분석에는 RFSP(Reactor Fuelling Simulation Program)을 사용하였다.

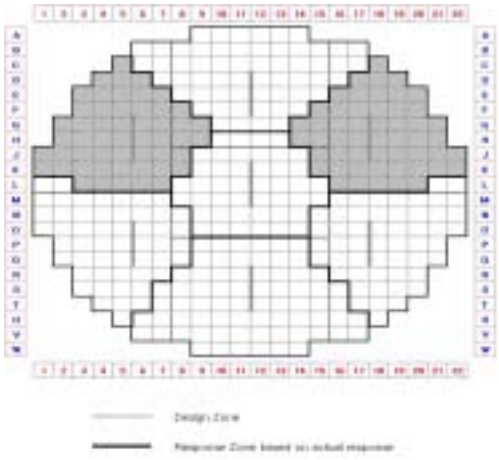
1. Design

액체영역제어계통은 [그림 1.1]과 같이 노심 내에 6곳에 설치되어 있으며 각각 2~3개의 격실로 나뉘어 총 14개의 격실로 구성되어 있다. 격실내의 경수 양을 조절하여 핵연료 교체 등으로 발생하는 출력 Tilt를 평탄하게 하는 기능을 한다. 즉, 출력이 증가하면 경수량을 증가시켜 출력을 감소시키고 출력이 안정되면 경수량을 감소시켜 출력이 평탄하게 분포하도록 한다. 정상 운전의 경우 격실 내 수위를 40% 정도로 일정하게 유지한다.

Zone의 구성은 [그림 2]와 같고, 불안정 현상은 주로 상부 외곽 Zone(빗금 영역)에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 상부 외곽 Zone에 대한 반응도 변화를 모델링 하였다.



[그림 1.1] 노심 입체도



[그림 1.2] Zone Design

[표 1.1] Design Data of Core, Channel and Fuel

Total fission power	2158.5MW
Total reactor Power	2061.4MW(th)
Total Electrical Power	713MW(e)
Number of fuel channels(#1, 6, 8, 13)	52
Length of fuel channel(12 bundles)	594.4㎝
Average fuel temperature	687℃
Bundle design	37-element UO_2
Element outside diameter	1.31㎝
Average sheath wall thickness	0.04㎝
UO_2 pellet outside diameter	1.22㎝
Stack length	48.20㎝
UO_2 density	10.62g/㎤
UO_2 weight per bundle	21.782㎏
U weight per bundle	19.116㎏
Max. Element rating for bundle Power of 800kW	49.37W/㎝
Max. linear bundle rating for bundle power of 800kW	16.13kW/㎝

월성 2호기는 캐나다원자력공사(AECL : Atomic Energy of Canada Limited)의 CANDU-6형 원자로이며 각 부분의 주요 Design Data는 [표 1.1]에 간략하게 정리하였으며, 핵연료 교체 및 온도에 대한 반응도 변화 계산에 사용되었다.

2. 핵연료 교체에 따른 반응도 변화 모델

중수로에는 천연우라늄이 사용되며 연료가 연소되면 U^{235}의 핵분열로부터 에너지, 핵분열 생성물 및 중성자가 방출된다. 이 때 방출된 중성자들의 일부는 다른 U^{235}와 연쇄반응을 일으키는 한편, 일부 중성자들은 U^{238}에 흡수되어 Pu^{239}를 생성한다. 새로운 핵연료는 평형상태의 연료로 6~7개월 연소되어 분열성 물질 감소와 중성자 흡수 분열단면들의 증가로 반응도는 지속적으로 감소하게 된다. 운전 중 연료 교체 는 평형상태의 연료에서 분열성 물질의 지속적인 감소를 보상하게 된다. 따라서 핵연료 교체 후 Zone의 반응도 변화를 RFSP를 이용하여 모델링 하였다.

2.1 RFSP의 POWDERPUF-V

POWDERPUS-V(PPV)는 Lattice Cell 계산용으로 각종 Parameter가 연소도에 따라 어떻게 변하는지 계산하며 각종 온도계수 등의 계산에 사용된다. PPV 계산 결과에서 연소도(MWD/kgU)에 따른 반응도(K_{eff}-1/K_{eff})변화를 얻을 수 있었고, 다음과 같이 변환하여 모델링에 적용하였다.

[표 1.1]에서 Uranium Mass/Bundle은 19.116㎏ 이다. Channel당 12개(Low Zone 6개, High Zone 6개)의 Bundle이 장전되고, 본 모델링에서의 관심 영역은 한 개의 Zone이므로 6개의 Bundle에 해당되며 이에 대한 Uranium의 총질량은 19.116㎏ × 6 = 114.696㎏ 이다. Bundle에 대한 평균 출력은 약 800kW이므로 6개 Bundle에 대한 출력은 4800kW이이므로

[연소도(kWD/㎏U) × Uranium 질량(㎏)] / 평균출력(kW) = 시간(Day)

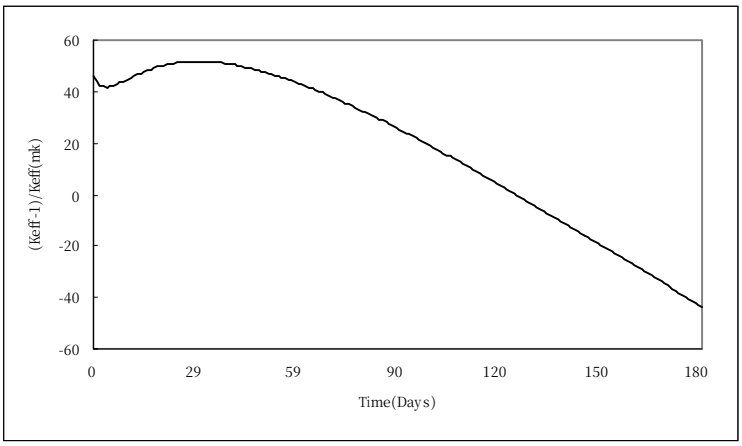
따라서 시간에 대한 반응도 변화는 [그림 2.1]과 같고, 결과에 대한 함수는 (2.1)식과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho(t) = 46.278 - 3.166t + 0.765t^2 - 0.078t^3 + 0.004t^4 \qquad (0 \leq t \leq 3.728\text{일})$$

$$\rho(t) = 36.993 + 1.099t - 0.026t^2 + 2.099\times10^{-4}t^3 - 1.047\times10^{-6}t^4 + 3.103\times10^{-9}t^5 - 4.925\times10^{-12}t^6 + 3.215\times10^{-15}t^7 \qquad (t > 3.728\text{일}) \quad (2.1)$$

상부 외곽 Zone 이며 이들은 각각 52개의 Channel로 구성되어 있다. 특정 시점에서 Zone의 반응도를 계산하기 위해서 다음과 같은 절차를 수행하였다.

(1) 각 Channel의 연료 교체 이력에서 교체 시점부터 특정 시점까지의 기간을 계산한다.
(2) 계산된 기간을 $\rho(t)$에 적용하여 특정 시점에서 Channel에 대한 반응도를 계산한다.
(3) Zone의 평균 반응도를 계산한다.



[그림 2.1] 핵연료 교체 후 Channel의 시간에 따른 반응도 변화

3. 출력 변화에 따른 Xe의 반응도 변화 모델

3.1 Xe 농도 모델

Xe은 핵분열에 의해 즉발 생성되거나 I^{135}가 β^-붕괴하여 생성된다. 또한 Xe는 방사성 핵종이므로 Sc^{135}로 자연 붕괴되거나 중성자를 포획하여 Xe^{136}을 생성하며 소멸되기도 한다. 한편 I^{135}는 핵분열로부터 직접 생성되거나 Te^{135}가 붕괴하여 생성된다. 하지만 Te^{135}의 반감기가 짧으므로 핵 분열시 Te^{135}의 생산물을 I^{135}에 포함시켜 I^{135}가 직접 생성 된다고 가정하고 I^{135}의 중성자 흡수는 미미하므로 무시하고 자체붕괴만을 고려하면 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \gamma_I \Sigma_f \phi - \lambda_I I \ , \quad \frac{\partial X}{\partial t} = \gamma_X \Sigma_f \phi + \lambda_I I - \lambda_X X - \sigma_a^X \phi X \tag{3.1}$$

$$I(0) = 0, \quad X(0) = 0 \tag{3.2}$$

원자로가 정상 상태로 운전되면 I와 Xe의 농도가 평형상태에 도달한다. 따라서 초기 조건을 $\frac{\partial I}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial X}{\partial t} = 0$을 적용하면 평형상태에서 I와 Xe의 농도는 다음과 같다.

$$I_\infty = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} \ , \ X_\infty = \frac{(\gamma_I + \gamma_X)\Sigma_f \phi_0}{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0} \tag{3.3}$$

3.2 Xe의 반응도 모델

Xe에 의한 반응도 변화는 농도가 0(Clean fuel)을 기준으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\rho \simeq \frac{\Sigma_a^P/\Sigma_a}{1+L^2B^2}$$

실제 상업용 원자로에서 L^2B^2은 매우 작을 뿐만 아니라 노심내의 특정 Channel 내에서는 $L^2B^2 \approx 0$이다. 따라서 Xe에 의한 반응도는 다음과 같다.

$$\rho \simeq -\frac{\Sigma_a^P}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^X Xe}{\Sigma_a} \tag{3.4}$$

$\rho(t)$를 시간에 대한 Xe의 반응도라 하면 다음과 같다.

$$\rho(t) \fallingdotseq -\frac{\Sigma_a^X(t)}{\Sigma_a} \tag{3.5}$$

3.3 평형 상태에서 Xe의 반응도

평형 상태에서의 I와 Xe의 농도는 식(3.3)과 같다. 여기서 Xe의 농도를 식(3.5)에 적용하여 평형상태의 Xe의 반응도를 구하면 다음과 같다.

$$\rho \cong -\frac{\Sigma_a^X}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^X}{\Sigma_a}\frac{(\gamma_I+\gamma_X)\Sigma_f\phi_0}{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_0} \tag{3.6}$$

Critical Reactor에서 leakage는 무시될 수 있고, $k=(\frac{\nu\Sigma_f}{\Sigma_a})p\epsilon=1$ 이다.

즉, $\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}=\frac{1}{\nu p\epsilon}\sim\frac{1}{\nu}$ 이므로 $\rho \cong -\frac{(\gamma_I+\gamma_X)\phi_0}{\nu(\frac{\lambda_X}{\sigma_a^X}+\phi_0)}$ 이다. (3.7)

3.5 출력 변화에 따른 Xe의 반응도

출력이 ϕ_0에서 ϕ_I으로 변화하는 과도상태를 가정해보자. 이때 일시적으로 중성자속의 증가로 Xe의 생성량(붕괴+핵분열)보다 감소량(흡수+붕괴)이 증가하여 Xe의 농도가 줄어들며 반응도는 증가한다. 하지만 시간이 흐름에 따라 I이 붕괴되어 생성되는 Xe의양이 증가하여 결국 반응도는 감소한다. 이때의 I와 Xe의 지배방정식을 세우면 (3.1)식과 같고 단지 초기

조건만 $I(0)=I_{\infty}$, $X(0)=X_{\infty}$ 로 된다. 따라서 $I(t)$와 $X(t)$는 다음과 같다.

$$I(t)=\frac{\gamma_I\Sigma_f\phi_o}{\lambda_I}\left[1-\left(\frac{\phi_I-\phi_o}{\phi_I}\right)e^{-\lambda t}\right] \tag{3.8}$$

$$X(t)=\frac{(\gamma_I+\gamma_X)\Sigma_f\phi_I}{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I}\times\left\{1-\left(\frac{\phi_I-\phi_0}{\phi_I}\right)\frac{\lambda_X}{\lambda_{X+}\sigma_a^X\phi_0}e^{-(\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I)t}\right.$$
$$\left.+\left(\frac{\gamma_I}{\gamma_X+\gamma_I}\right)\left(\frac{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I}{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I-\lambda_I}\right)\left[e^{-\lambda_I t}-e^{-(\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I)t}\right]\right\} \tag{3.9}$$

따라서 출력 변화에 따른 Xe의 반응도식은 다음과 같다.

$$\rho(t)=\frac{\sigma_a^X X(t)}{\Sigma_a}=\frac{\sigma_a^X(\gamma_I+\gamma_X)\Sigma_f\phi_I}{\Sigma_a(\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I)}\times\left\{1-\left(\frac{\phi_I-\phi_0}{\phi_I}\right)\frac{\lambda_X}{\lambda_{X+}\sigma_a^X\phi_0}e^{-(\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I)t}\right.$$
$$\left.+\left(\frac{\gamma_I}{\gamma_X+\gamma_I}\right)\left(\frac{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I}{\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I-\lambda_I}\right)\left[e^{-\lambda_I t}-e^{-(\lambda_X+\sigma_a^X\phi_I)t}\right]\right\} \tag{3.10}$$

4. 출력 변화에 따른 Sm의 반응도 변화 모델

4.1 Sm의 농도 모델

핵분열 생성물 중 Sm^{149}도 원자로 반응도 면에서 중요한 핵종의 하나이다. Sm은 자연 중에서 안정되어 있으므로 붕괴되지 않고 단지 중성자에 의해서만 흡수된다. 또한 Nd^{149}로부터 두 번 β^- 붕괴되어 생성된다. 한편 Nd의 반감기가 Pm^{149}에 비해 매우 작으므로 Xe에서와 마찬가지로 분열시 직접 Pm으로 γ_P 만큼 생성된다고 가정하여도 무방하다. 출력이 ϕ_0로 일정시간 운전된 후 ϕ_1으로 증가한 경우 Sm의 농도에 관한 지배방정식과 초기 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\gamma_P\Sigma_f\phi_I-\lambda_P P,\quad \frac{\partial S}{\partial t}=\lambda_P P-\sigma_a^S\phi_I S \tag{4.1}$$

초기조건 ; $P_0=\frac{\gamma_P\Sigma_f\phi_0}{\lambda_P}$, $S_0=\frac{\gamma_P\Sigma_f}{\sigma_a^S}$

따라서 Sm의 농도는 다음과 같다.

$$S=\frac{\gamma_P\Sigma_f}{\sigma_a^S}\left[1+\frac{\phi_0-\phi_I}{\phi_I-\lambda_P/\sigma_a^s}(e^{-\lambda_P t}-e^{-\sigma_a^S\phi_I t})\right] \tag{4.2}$$

4.2 Sm의 반응도 모델

Xe의 반응도 모델링 경우와 마찬가지로 평형상태에서의 Sm의 반응도는

$$\rho \cong -\frac{\Sigma_a^S(0)}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^S S_0}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^S}{\Sigma_a}\ \frac{\gamma_P \Sigma_f}{\sigma_a^S} = -\frac{\gamma_P \Sigma_f}{\Sigma_a} = -\frac{\gamma_P}{\nu} \tag{4.3}$$

이므로 출력이 ϕ_0에서 ϕ_I으로 변화할 때 Sm 반응도 변화는 다음 식과 같다.

$$\rho \cong -\frac{\Sigma_a^S(t)}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^S}{\Sigma_a}\frac{\gamma_P \Sigma_f}{\sigma_a^S}\ 1 + \frac{\phi_0 - \phi_I}{\phi_I - \lambda_P/\sigma_a^s}\left(e^{-\lambda_P t} - e^{-\sigma_a^S \phi_I t}\right)$$

$$= -\frac{\gamma_P}{\nu}\ 1 + \frac{\phi_0 - \phi_I}{\phi_I - \lambda_P/\sigma_a^s}\left(e^{-\lambda_P t} - e^{-\sigma_a^S \phi_I t}\right) \tag{4.4}$$

5. 핵연료 온도변화에 따른 반응도 모델

출력의 증가는 핵연료의 온도상승을 가져오며 핵연료 온도상승은 (-)반응도 효과(Doppler Effect)를 가져온다. 따라서 출력이 P_0에서 P_1으로 상승하면 핵연료의 평균온도 상승을 예측하는 모델이 필요하다. 이 때 우선 간단한 모델을 위해 핵연료봉내의 출력 분포는 균질하고 축방향의 출력 분포 형태도 변하지 않으며 모든 물성치도 동일하다고 가정하자. 물론 열전도도를 비롯하여 연료 구성 재료 성분도 변할 수 있으나 온도변화와 중성자속의 변화가 그리 크지 않으므로 이러한 가정은 타당하다고 할 수 있다. 단지 핵연료 내의 반경 방향에 대한 균일 출력 가정이 오차를 유발 할 수 있으나 이 또한 그리 크지 않으므로 원통형 핵연료봉내의 온도분포는 다음과 같다.

$$T - T_s = \frac{\dot{q}''}{4\pi k_f}\ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tag{5.1}$$

또한 평균온도 차는 다음과 같이 유도된다.

$$\overline{T} - T_s = \frac{\int_0^R \rho C_P T(r) 2\pi r dr}{\int_0^R \rho C_P 2\pi r dr} = \frac{\frac{\dot{q}''}{4\pi k_f}\int_0^R 2\pi\left(r - \frac{r^3}{R^2}\right)dr}{\pi R^2} = \frac{\frac{\dot{q}''}{4\pi k_f} 2\pi\left(\frac{1}{2}R^3 - \frac{1}{4}R^2\right)}{\pi R^2}$$

$$= \frac{\dot{q}''}{8\pi k_f} \tag{5.2}$$

한편 $\dot{q}''$가 출력에 비례하므로 출력이 P_0에서 P_1으로 변할 때 핵연료 평균온도 상승차는

$$\overline{T_1} - \overline{T_0} = \Delta\overline{T} = \frac{\dot{q}''_1 - \dot{q}''_0}{8\pi k_f} = \frac{\dot{q}''_0}{8\pi k_f}\left(\frac{\dot{q}''_1}{\dot{q}''_0} - 1\right) \tag{5.3}$$

이므로 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta\overline{T_f} = \Delta\overline{T}_{f_0}\left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right) \tag{5.4}$$

여기서 $\Delta\overline{T}_{f_0}$는 출력 P_0에서 연료내의 평균온도와 핵연료 표면과의 온도차이고 $\Delta\overline{T}_f$는 $\overline{T}_{f_1} - \overline{T}_{f_0}$로서 출력 P_1과 P_0에서 핵연료내의 평균온도차이다. 또한 R은 핵연료 반경을, k_f는 핵연료의 열전도도를 나타낸다.

출력상승에 따라 핵연료 온도가 상승하고 이에 따라 핵연료 고유의 (-)반응도 삽입효과가 나타난다. 이러한 온도 상승에 따른 (-)반응도 효과를 핵연료 온도계수(Fuel Temperature Coefficient)로 나타내며 1°K 상승에 따른 반응도 변화로 표시한다. 또한 핵연료 온도 계수는 즉각적으로 나타나므로 시간적 지연이 없으므로 핵연료 온도계수를 α_T라고 하면 출력 상승에 따른 (-)반응도는 다음과 같이 간략하게 계산이 가능하다.

$$\Delta\rho_T = -\alpha_T\Delta\overline{T_f} = -\alpha_T\Delta\overline{T}_{f_0}\left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right) \tag{5.5}$$

차후 사용상 편의를 위해 출력과 반응도를 시간의 함수로 표시하면 다음과 같다.

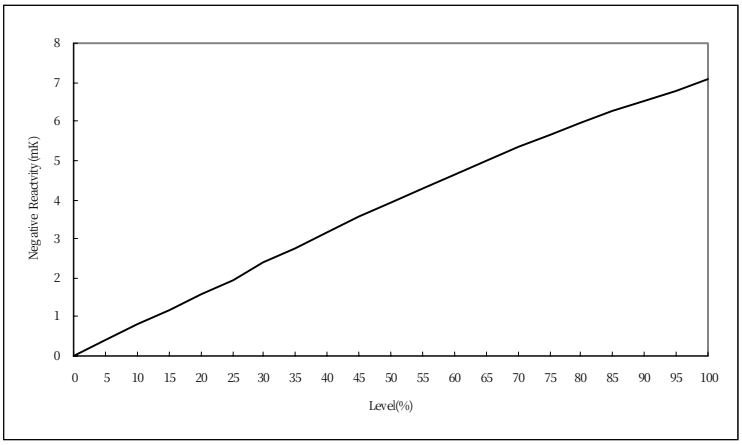
$$\Delta\rho_T(t) = -\alpha_T\overline{\Delta T}_{f_0}\left(\frac{P_1(t)}{P_0} - 1\right) \tag{5.6}$$

6. 액체영역 제어기의 수위에 따른 반응도 변화 모델

액체영역 제어기(LZC)는 격실 내 경수양의 변화를 통해 열중성자 이용률을 조절함으로써 반응도를 제어한다. 모든 LZC에서는 0.45ℓ/s의 일정량의 경수가 유출되며 유입범위(0~0.9ℓ/s)를 조절하여 경수 수위를 변화시킨다. 통상적으로 수위의 운전 범위는 30~80%이며 약 7mk의 반응도를 갖는다.

6.1 RFSP의 SIMULATE

SIMULATE 모듈은 이미 알고 있는 초기조건에서 시작하여 주어진 시간 단계동안의 출력 및 연소도를 모사한다. Input 작성시 LZC의 경수 수위를 0~100%까지 5%단위로 변화를 주어 계산하였고 결과 Data를 수위 5%당 반응도 변화로 누적하여 정리하였다.



[그림 6.1] LZC 수위 5%당 반응도 변화율

결과에서 LZC 수위에 대한 반응도 변화는 다음 식과 같다.

$$\rho(\ell) = 0.005 + 0.078\ell + 9.293\times10^{-5}\ell^2 - 1.647\times10^{-6}\ell^3 \quad (0 \le \ell \le 100\%) \quad (6.1)$$

7. 출력과 반응도

원자로가 정격출력 운전 중 어떤 원인으로 반응도변화가 일어나면 원자로는 비정상상태가 되어 출력이 변하게 되고 이러한 출력특성을 동특성이라고 한다. 동특성 방정식을 통하여 출력과 반응도의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 특정 시점(t=0)에서 t시간까지의 출력 변화에 대한 반응도를 알 수 있다.

$$\frac{P(t)}{P_0} = \left(\frac{\beta}{\beta-\rho_0}\right)e^{\left(\frac{\lambda\rho_0}{\beta-\rho_0}\right)t} - \left(\frac{\rho_0}{\beta-\rho_0}\right)e^{-\left(\frac{\beta-\rho_0}{\Lambda}\right)t} \quad (7.1)$$

원자로 동특성의 주된 효과는 지발 중성자 분율(β) 이 변하는 것이며 U^{235}의 경우 0.0065, Pu^{239}의 경우 0.0021이다.

8. 모델의 검증 및 통합

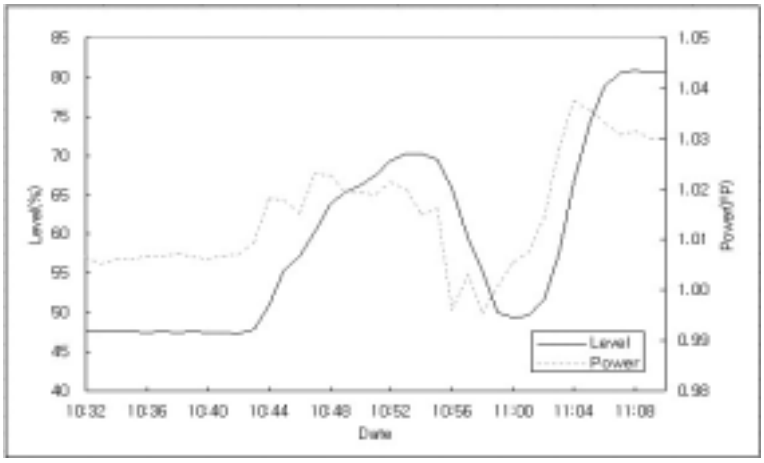
앞 절에서 각 모델의 결과인 반응도에 대한 방정식 및 통합 모델은 C 언어로 Code화 하였으며 모델의 타당성을 검증하기 위해 월성 2호기의 출력 및 수위에 대한 운전 Data

를 적용하여 다음과 같이 분석하였다.

각 모델의 반응도 변화를 $\Delta\rho_P$(출력 변화에 대한 반응도 변화), $\Delta\rho_X$(Xe에 의한 반응도 변화), $\Delta\rho_S$(Sm에 의한 반응도 변화), $\Delta\rho_F$(핵연료 온도에 의한 반응도 변화), $\Delta\rho_L$(LZC 수위 변화에 대한 반응도 변화)로 나타내면 전체(Zone) 반응도 변화 $\Delta\rho_T$는 다음과 같다.

$$\Delta\rho_T = \Delta\rho_P + \Delta\rho_X + \Delta\rho_S + \Delta\rho_F + \Delta\rho_L \tag{8.1}$$

정상 운전일 경우 K = 1을 유지하므로 특정 시점 t에서의 반응도 변화율은 $\Delta\rho_T \simeq 0$, 불안정 현상(급등현상 발생을 기준)이 발생할 경우 K > 1이므로 특정 시점 t에서의 반응도 변화율은 $\Delta\rho_T > 0$ 임을 확인 할 수 있으면 모델을 검증 할 수 있다.



[그림 8.1] 월성 2호기 G19 연료교체 후 Zone #13 수위 및 출력 변화(분단위)
(2002년 10월 30일 10:32 ~ 2002년 10월 30일 11:08)

[그림 8.1]은 월성 2호기의 운전 Data 중 불안정 현상이 발생한 부분의 일부를 발췌한 것이다. 그림에서 정상 운전 중 출력과 수위가 급등하는 현상을 볼 수 있다. 따라서 이 부분의 Data를 모델에 적용하여 $\Delta\rho_T$를 계산하였다.

계산 결과 [표 8.1]과 같이 정상 운전 범위에서 $\Delta\rho_T = 0$, 출력 및 수위 급등부분에서 $\Delta\rho_T > 0$인 부분을 확인 할 수 있다. 물론 정상 운전 영역이나 불안정 영역 모두에서 $\Delta\rho_T$의 값에 $\pm\mu k$정도의 오차가 있었으나 운전 Data가 고정된 값이 아니고 출력과 수위의 관계에 의한 흔들림을 갖기 때문에 이를 고려한다면 전체적으로 각 모델의 계산 결과는 비교적 타당하다고 할 수 있다.

따라서 핵연료 교체에 의한 반응도 변화 $\Delta\rho_C$로 나타내고, $\Delta\rho_P$ 대신 $\Delta\rho_C$ 적용한다면 시간에 대한 Zone의 반응도 변화 $\Delta\rho_T(t)$를 계산 할 수 있으며 각각의 시점에서 LZC의 수위도 계산이 가능하다.

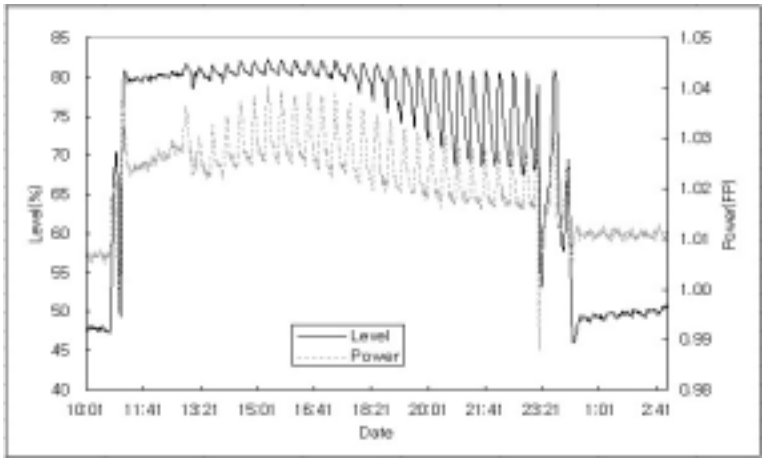
이러한 모델의 통합은 하나의 특정 모델과 다른 모델들과의 관계를 분석할 수 있으며 반복 계산(Iteration)을 통해 시간에 대한 Zone의 출력변화 및 LZC의 수위변화 등 여러 현상들을 모사할 수 있다.

[표 8.1] 월성 2호기 출력 및 수위 Data를 적용한 $\Delta\rho_T$의 계산 결과

Power(%)	Level(%)	Reactivity(mk)					
		$\Delta\rho_P$	$\Delta\rho_L$	$\Delta\rho_X$	$\Delta\rho_S$	$\Delta\rho_F$	$\Delta\rho_T$
1.00729	47.56771						
1.00684	47.97721	-0.003	-0.028	-0.002	0.000	0.033	0.000
중 략							
1.03626	81.79758	-0.006	0.015	-0.005	0.000	0.069	0.073
1.03553	81.77734	-0.004	0.001	-0.003	0.000	0.052	0.046
1.03373	81.75521	-0.010	0.001	-0.008	0.000	0.129	0.111
1.03348	81.59180	-0.001	0.009	-0.001	0.000	0.018	0.024

9. 불안정 현상 발생원인 추정 및 모사

본 연구에서는 Xe에 의한 반응도 변화를 불안정 현상의 원인으로 추정하였으며 이로 인한 불안정 현상 발생을 모사하고자 한다. 불안정 현상은 [그림 9.1]과 같이 출력과 수위가 급등한 후 Cycling 하다 다시 급락하는 형태가 일반적이다.



[그림 9.1] 월성 2호기 G19 연료교체 후 Zone #13 수위 및 출력 변화
(2002년 10월 30일 10:32 ~ 2002년 10월 30일 11:08)

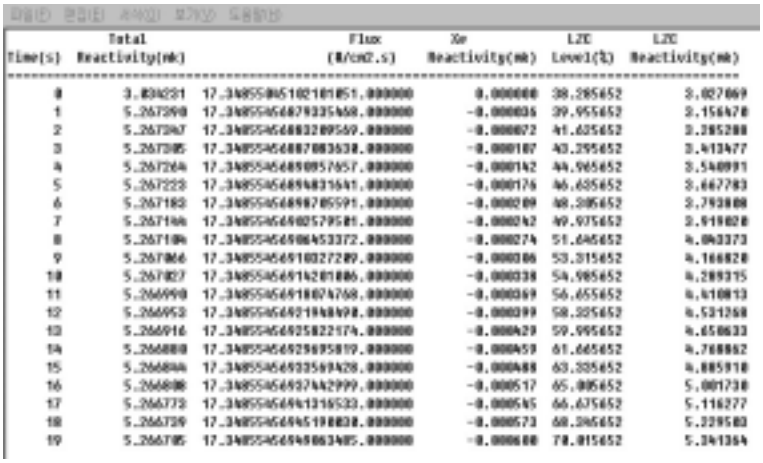
Cycling 현상을 제외한 급등과 급락 현상에 대한 단계를 다음과 같이 가정하였다.

1) 상부 외곽 Zone에 출력이 높은 상태에서 핵연료가 교체된다. 특정 시점에서 RFSP Data와 운전 Data가 일치하지 않을 수 있기 때문에 비교적 높은 출력에서 연료교체가 이루어 질 수 있다.
2) Zone의 출력 제어를 위해 LZC의 수위가 증가하고 높은 출력 때문에 쉽게 80%에 도달한다.

3) 수위가 80%를 초과하면 격실의 Flooding을 방지하기 위해 제어가 출력우선에서 수위 우선으로 변경되고, 수위 고정으로 제어 능력이 상실된다.
4) 따라서 Zone의 출력은 일정 부분(105~108%) 상승한다.
5) 출력증가는 Xe의 농도를 감소시키고 감소된 Xe의 반응도만큼 출력은 다시 증가하게 된다. 이러한 악순환을 통해 출력이 급등하게 된다.
6) 각 제어 계통의 참여로 출력은 증가된 일정수준에서 유지되고, 일정기간 운전이 지속되면 반응도 증가분이 소멸되어 출력이 감소된다.
7) 출력감소는 Xe의 반응도 증가를 가져와 다시 출력이 감소하는 악순환을 통하여 급락하게 된다.

위 가정과 같이 Xe의 반응도 변화에 의한 출력의 급등을 확인하기 위해 8절에서와 같이 월성 2호기의 출력 및 수위에 대한 운전 Data를 적용하였다. 식 (8.1)에서 Xe의 반응도 변화($\Delta\rho_X$)를 제외한 전체 반응도 변화를 $\Delta\rho_{T-X}$라 하면 급등 현상이 발생하는 시점에서 $\Delta\rho_{T-X} \leqq 0$ 이고 $\Delta\rho_T > 0$ 이 된다면 Xe의 반응도 변화에 의해 Zone의 반응도가 (+)가 된다 할 수 있다. 즉, 출력 증가에 따른 Xe의 (-)반응도가 감소하여 그만큼 출력이 증가한다고 할 수 있다. 그러나 안타깝게도 위의 조건을 만족하는 결과를 찾을 수 없었다.

또한 월성 2호기 운전 Data와 동일한 초기 조건을 주고 통합 모델을 통해 모사 하였으나 결과는 [그림 9.2]와 같이 Xe의 반응도 변화로 인한 Zone의 반응도 증가량이 LZCS의 제어 영역(80%)을 넘어 출력이 급등하는 현상은 확인할 수 없었다.



Time(s)	Total Reactivity(mk)	Flux (N/cm2.s)	Xe Reactivity(mk)	LZC Level(%)	LZC Reactivity(mk)
0	3.834231	17.3455045102101051.000000	0.000000	38.285652	3.027869
1	5.267269	17.3455045687935468.000000	-0.000036	39.955652	3.156478
2	5.267347	17.3455045688209569.000000	-0.000072	41.625652	3.285288
3	5.267385	17.3455045688708638.000000	-0.000107	43.295652	3.413477
4	5.267264	17.3455045689095657.000000	-0.000142	44.965652	3.540991
5	5.267223	17.3455045689483641.000000	-0.000176	46.635652	3.667783
6	5.267183	17.3455045689870591.000000	-0.000209	48.305652	3.793808
7	5.267144	17.3455045690257581.000000	-0.000242	49.975652	3.919020
8	5.267104	17.3455045690645372.000000	-0.000274	51.645652	4.043373
9	5.267066	17.3455045691032729.000000	-0.000306	53.315652	4.166828
10	5.267027	17.3455045691420106.000000	-0.000338	54.985652	4.289315
11	5.266990	17.3455045691807476.000000	-0.000369	56.655652	4.410813
12	5.266953	17.3455045692194898.000000	-0.000399	58.325652	4.531268
13	5.266916	17.3455045692582174.000000	-0.000429	59.995652	4.650633
14	5.266880	17.3455045692969519.000000	-0.000459	61.665652	4.768862
15	5.266844	17.3455045693356928.000000	-0.000488	63.335652	4.885918
16	5.266808	17.3455045693744299.000000	-0.000517	65.005652	5.001738
17	5.266773	17.3455045694131656.000000	-0.000545	66.675652	5.116277
18	5.266739	17.3455045694519083.000000	-0.000573	68.345652	5.229503
19	5.266705	17.3455045694906485.000000	-0.000600	70.015652	5.341364

[그림 9.2] Xe에 의한 반응도 변화 모사 결과

Ⅲ. 결 론

본 연구는 현재 진행 중이므로 성급한 결론은 일단 피하기로 하겠다. 다만 불안정 현상의 원인의 하나로 추정했던 Xe에 의한 반응도 변화가 생각보다는 크지 않음은 확인 할 수 있었다. 또한 LZC 수위와 출력과의 관계 등 병행해서 진행 중인 연구에 연계하여 사

용할 수 있는 모델이 작은 성과라 할 수 있겠다.

차후 액체영역제어계통의 불안정 현상을 정확하게 모사하고 그 원인에 대한 충분한 설명을 위해 다음과 같은 연구가 진행 되어야 한다.

1) 모델의 Code화 과정에서의 오류를 점검하고, Input의 정밀도를 높여 정확한 모델을 완성하여야 한다.
2) 모델의 정확한 검증을 위해 정상 운전 및 불안정 현상이 발생한 때의 운전 Data를 충분히 집하고 분석하여 다각도로 적용시켜야 한다.
3) 완성된 모델을 병행 중인 연구에 연계하는 방법을 모색하여야 한다.

Ⅳ. 참고문헌

1) AECL, CANDU 6 Liquid Zone Control Units(XX-31750-DM-000), January 1995
2) AECL, Wolsong-1 Nuclear Generating Station Liquid Zone Control System (DM-59-34810/63480), December 1979
3) AECL, RFSP Program Description(TTR-370 Rev1 COG-94-580), April 1995
4) AECL, CANDU 6 Generating station Physics Design Manual(86-03310-DM-000)
5) AECL, RFSP User Manual(TTR-321 Rev1 COG-93-104), July 1993
6) 박귀남, 중수로개요(I) (II), 1989
7) James J. Duderstadt & Louis J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, January 1976
8) John R. lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, 1983